

Le potentiel des biotechnologies n'est plus à démontrer. Il convient aujourd'hui de faire les choix les plus appropriés, et de développer les partenariats, en anticipant les conséquences socio-économiques de ces choix.

Biotechnologies

quelles perspectives pour les cultures pérennes tropicales ?

Meunier J.

CIRAD-CP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1

Prévoir l'évolution et les impacts possibles des biotechnologies dans les vingt prochaines années constitue un exercice risqué ; en déduire les conséquences socio-économiques devient une gageure.

Une telle période peut paraître longue face aux développements incroyablement accélérés de la génétique moderne, mais relativement courte par rapport aux délais généralement rencontrés chez les plantes pérennes. N'oublions pas, par exemple, que les premières recherches sur la multiplication végétative du palmier à huile commencèrent il y a vingt-cinq ans.

Avant de se lancer dans une telle perspective, il semble donc prudent de regarder, en sens inverse, ce qui s'est passé au cours des vingt dernières années. Force est de constater avec Deshayes (1994) que, malgré les percées remarquables des outils et des connaissances de base, les perspectives n'ont pas fondamentalement évolué et que le nombre de produits issus des biotechnologies reste limité, bien en deçà de l'essor que certains annonçaient. Cet excès d'optimisme tient, selon l'auteur, à la sous-estimation, à la fois des difficultés techniques, et de la complexité des processus de diffusion de l'innovation.

Cela ne doit pas nous inciter, selon le mouvement classique du retour de balancier, à tomber dans un pessimisme excessif. Au contraire, cela doit nous pousser à réévaluer avec plus de pragmatisme les perspectives, toujours aussi brillantes, offertes par les biotechnologies.

Dans ce qui va suivre, nous tenterons d'abord de faire le point sur les recherches concernant les biotechnologies, chez les cultures pérennes, dans quatre domaines principaux : la culture de tissus *in vitro*, les outils moléculaires, le génie génétique, la transformation des produits. Nous nous attacherons, chaque fois, à préciser les utilisations et les applications possibles. Ensuite nous évoquerons quelques idées concernant les avantages et les risques pour les pays en développement, ainsi que les éventuels impacts socio-économiques.

La multiplication *in vitro*, succès et difficultés

La biologie des espèces tropicales pérennes a conduit les sélectionneurs à distinguer :

- les plantes ayant une possibilité naturelle de multiplication végétative comme le bananier, le caféier, l'hévéa..., pour lesquelles les programmes d'amélioration génétique sont longtemps restés relativement légers (il était plus facile de sélectionner et de multiplier les individus d'élite) ;
- les espèces à multiplication sexuée stricte comme le palmier, le cocotier..., pour lesquelles tous les efforts se sont concentrés sur l'amélioration, mais où les gains génétiques obtenus ne pouvaient être transférés que partiellement par les semences. C'est pour ce dernier groupe que les perspectives offertes par la culture *in vitro*, à la fin des années 60, étaient particulièrement at-

trayantes. Paradoxalement, c'est pour le premier groupe que la technique pouvait être plus facilement développée et mise en oeuvre. Ainsi, chez les bananiers, la multiplication par prolifération de méristèmes devient tout à fait compétitive par rapport à la multiplication végétative classique. La production de vitroplants de bananiers (puissance de multiplication, délocalisation de la production) a différents avantages. Le plus important est certainement la qualité sanitaire, qui augmente les rendements tout en réduisant l'utilisation des nématicides, par ailleurs très agressifs pour l'environnement. Aujourd'hui, plus de 100 millions de vitroplants de bananiers sont produits annuellement dans le monde (Equateur, Colombie, Philippines...).

Le microbouturage des caféiers est maîtrisé depuis une vingtaine d'années. Des unités de multiplication fonctionnent au Costa Rica, au Honduras, en Ouganda..., qui diffusent à grande échelle des hybrides hétérozygotes intéressants.

Pour le palmier à huile, la multiplication par embryogenèse somatique est résolue à petite échelle. Des laboratoires de création clonale et de production existent en Côte d'Ivoire, en Indonésie et en Malaisie. Les résultats observés sur plus d'un millier d'hectares confirment les progrès théoriques prévus : augmentation des rendements de 12 % sans sélection des clones et jusqu'à 30 % après le choix des meilleurs (tableau 1). De tels progrès sont pratiquement irréalisables à court terme par amélioration classique.

Ces succès réels ne doivent pas masquer les difficultés techniques liées à ces procédés. L'apparition toujours possible de variants reste à contrôler, surtout en embryogenèse somatique comportant une phase de callogenèse comme chez le palmier. Chez le bananier, le risque n'est pas négligeable non plus de multiplier les mutations naturelles possibles. Par ailleurs, les difficultés du passage à l'échelle industrielle conduisent à des coûts de production encore trop élevés du fait des installations et des contrôles nécessaires (palmier).

Il faut également mentionner que, même si ces procédés ne sont pas encore directement appliqués au développement, la multiplication par microbouturage et/ou embryogenèse somatique est disponible pour presque toutes les espèces tropicales

Tableau 1. Production observée de clones de palmier à huile en Indonésie (moyenne annuelle à 5 et 6 ans)
Oil palm clone yields observed in Indonesia (annual mean at 5 and 6 years)

	Production (t/ha) / Yields (t/ha) régimes / FFB	huile/oil	% d'extraction / Extraction rate huile/régime — oil/FFB
Croisement témoin <i>Control cross</i>	24.4	5.7	23.3
Ensemble des clones <i>All clones</i>	26.6	6.4	24.1
2 meilleurs clones <i>Best 2 clones</i>	28.9	7.8	26.9

cultivées : hévéa, cacaoyer, agrumes, fruitiers divers, eucalyptus, acacias, cocotier... (Escalant et Teisson, 1988 ; Montoro *et al.*, 1993 ; de Touchet *et al.*, 1991 ; Verdeil *et al.*, 1993). Il s'agit alors d'outils de recherche qui sont utilisés pour la mise au point de stratégies et de méthodologies nouvelles : multiplication de porte-greffes ou étude des interactions greffon/porte-greffes, par exemple.

La culture *in vitro* a également des applications dans la recherche et la production de variétés : création d'hybrides somatiques (agrumes), et de lignées haploïdes (agrumes, caféiers, bananiers), sauvetage d'embryons, tests précoces... Ces méthodes se trouvent encore à des stades prospectifs et d'emploi relativement difficile, sauf dans deux domaines appelés à se développer rapidement :

- les échanges de matériel végétal sain ;
- la conservation du matériel génétique, en particulier avec la cryopréservation d'embryons zygotiques ou somatiques, bien maîtrisée chez plusieurs espèces d'agrumes, palmier, cocotier, caféier... (Assy-Bah et Engelmann, 1993 ; Dumet *et al.*, 1993 ; Engelmann *et al.*, 1994).

Puissance des outils moléculaires

Les outils nouveaux comme les marqueurs enzymatiques, phénoliques, nucléiques, ont évidemment suscité un grand intérêt des chercheurs, qui entrevoyaient enfin la possibilité d'analyser plus finement des espèces et des populations dont la génétique était balbutiante.

La structure de la diversité génétique et l'identification

Les isozymes ont été les premiers marqueurs génétiques étudiés. Pour chaque espèce, 8 à 15 systèmes enzymatiques polymorphes sont analysables à partir d'organes

facilement accessibles : feuille, pollen, embryon...

Les connaissances nouvelles sur l'organisation de la diversité dans les espèces ont confirmé ou réorienté les schémas d'amélioration. Ainsi, on a pu vérifier la structuration du genre *Citrus* autour de trois pôles : cédratier, pamplemoussier et mandarinier (Ollitrault et Faure, 1992). Chez *Coffea canephora*, la mise en évidence de deux groupes complémentaires «guinéens» et «congolais» par Berthaud (1986) a conduit à mettre en place un schéma de sélection réciproque entre ces groupes.

L'utilisation plus récente des RFLP⁽¹⁾ et RAPD⁽²⁾ a affiné et précisé ces structures, notamment chez les bananiers, les cacaoyers et l'hévéa (Besse *et al.*, 1993 ; Laurent *et al.*, 1993). Une application immédiate a été la possibilité de contrôler et d'identifier le matériel végétal. Les chercheurs peuvent vérifier la légitimité des descendance en essai chez le palmier (une descendance occupe un demi hectare pendant vingt ans), l'origine des cals et embryons obtenus par culture d'ovule, ou des produits de fusion somatique chez les agrumes (Ollitrault et Rocca Serra, 1992). Quant aux planteurs, ils disposent d'un moyen de contrôler la nature hybride des semences de cacaoyer produits dans les champs semenciers biclonaux (Lanaud *et al.*, 1987). La détection des erreurs de conformité clonale dans les parcs à bois d'hévéa s'effectue maintenant en routine (Lebrun et Chevalier, 1990 ; Leconte *et al.*, 1994).

L'aide à la sélection

L'analyse moléculaire et la cartographie des génomes permettent une localisation assez fine des gènes d'intérêt agronomique et une meilleure compréhension de leur fonctionnement. Les travaux les plus avancés concernent :

(1) Restriction Fragment Length Polymorphism.

(2) Random Amplified Polymorphic DNA.



A. Rival

Prélèvement de tête de clone de palmier à huile à La Mé (Côte d'Ivoire).
Oil palm ortet sampling at La Mé (Côte d'Ivoire).

- le cacaoyer, qui possède un petit génome ($0,39 \times 10^9$ pb⁽³⁾) pour le génome haploïde, soit 2,7 fois le génome d'*Arabidopsis*) et pour lequel on dispose d'une première carte génétique comprenant 193 marqueurs liés avec une distance moyenne inférieure à 4 centimorgans (Lanaud *et al.*, 1993) (figure 1) ;
- le bananier, pour lequel une carte moléculaire de 77 marqueurs a été établie ;
- l'hévéa, les agrumes et les caféiers (Lashermes *et al.*, 1993).

Ces connaissances devraient permettre aux sélectionneurs de localiser précocement et de suivre un certain nombre de gènes dans les recombinaisons : ceux de la résistance aux maladies (*Phytophthora* chez le cacaoyer, *Cercospora* chez le bananier, *Microcyclus* chez l'hévéa...), ceux de la qualité, voire des caractères quantitatifs (QTL⁽⁴⁾).

Le diagnostic

Une des utilisations les plus prometteuses de la biologie moléculaire concerne l'identification, la caractérisation et la détection des pathogènes et de leurs formes spécialisées à l'intérieur d'une espèce. Des outils fiables de diagnostic existent déjà pour de nombreux champignons, virus, viroïdes... (Rohde *et al.*, 1993). L'utilisation des RFLP pour l'analyse des populations de parasites clarifie les interactions hôte x parasite et améliore les stratégies de lutte.

Chez le palmier à huile on a montré que les souches pathogènes de *Fusarium oxysporum* se regroupent en trois branches dont l'une correspond à l'Afrique Centrale (Nigeria, Zaïre, Cameroun), les deux autres à l'Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire, Bénin, Ghana), et que les souches d'Amérique du Sud auraient été introduites d'Afrique de l'Ouest. On a également mis en évidence une séquence de 2 330 pb qui semble impliquée dans la pathogénicité (Mouyna *et al.*, 1994).

Les *Mycosphaerella* spp. agents de la cercosporiose des bananiers et des plantains, présentent la plus forte diversité dans le sud-est asiatique, zone d'origine supposée de ce champignon. Dans les autres régions, les isolats forment des groupes homogènes et spécifiques à chacune d'elles (figure 2). Ces résultats permettent de mieux choisir les sites d'évaluation du matériel (Carlier *et al.*, 1994).

Des travaux identiques sont en cours pour les *Phytophthora* du cacaoyer et du

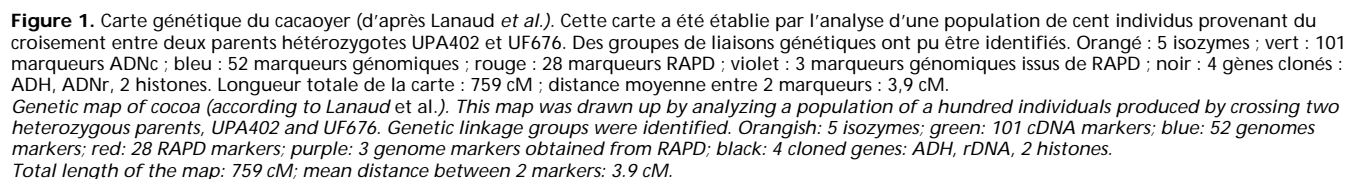


Cryoconservation,
réchauffement
des matériels
cryoconservés.
Cryopreservation,
thawing
cryopreserved
materials.

A. Rival

(3) pb = paire de base.

(4) Quantitative Trait Loci.



cocotier. «Les implications de ces recherches sont considérables en terme de protection des cultures, mais également en terme de prévision des risques et des systèmes d'avertissement à mettre en place. Ils seront importants en matière d'aide à la création et à la sélection variétales».

Ces techniques demeurent cependant d'une utilisation limitée dans les pays en développement, en particulier en ce qui concerne la biologie moléculaire, qui nécessite des investissements lourds et des coopérations fortes. Leur pleine utilisation nécessite encore de nombreux efforts de réduction des coûts, d'automatisation et de simplification.

Des solutions élégantes à échéances lointaines : le génie génétique

Les recherches en génie génétique sont encore aux stades préliminaires (mise au point des méthodes de transformation et des constructions génétiques, premières expressions de marqueurs classiques). Il est évident, cependant, que les espèces tropicales peuvent bénéficier des mêmes possibilités de modification des génomes que les espèces tempérées, pour lesquelles des variétés transgéniques sont déjà commercialisées ou en voie de l'être. Les cultures pérennes pourraient même constituer des cibles de choix pour ces technologies.

Les agrumes et les caféiers sont les candidats les mieux placés dans la mesure où ces espèces répondent assez bien à la transformation et à la régénération. Dans les deux cas, des plants résistants à la kanamycine et à l'hygromycine ont été obtenus après transformation avec *Agrobacterium tumefaciens* et/ou *Agrobacterium rhizogenes*. Les bananiers sont également bien placés, compte tenu des difficultés de l'amélioration classique, liées à la stérilité des cultivars triploïdes. Les objectifs prioritaires concernent alors la résistance aux virus (bananier, citrus) et aux insectes, (*Perileucop-tera coffeella* mineuse des feuilles du caféier).

Des projets sont également envisagés pour transformer l'hévéa, à l'aide d'ARN antisens du récepteur de l'hévéine, afin d'inhiber ou de retarder la coagulation du latex (clones «hémophiles»).

Quel que soit leur intérêt, il s'agit pour l'instant de recherches essentiellement prospectives. Il est fort probable que les délais nécessaires à la mise au point des techniques et surtout aux tests et à l'évaluation du matériel obtenu, puis à sa diffusion et à

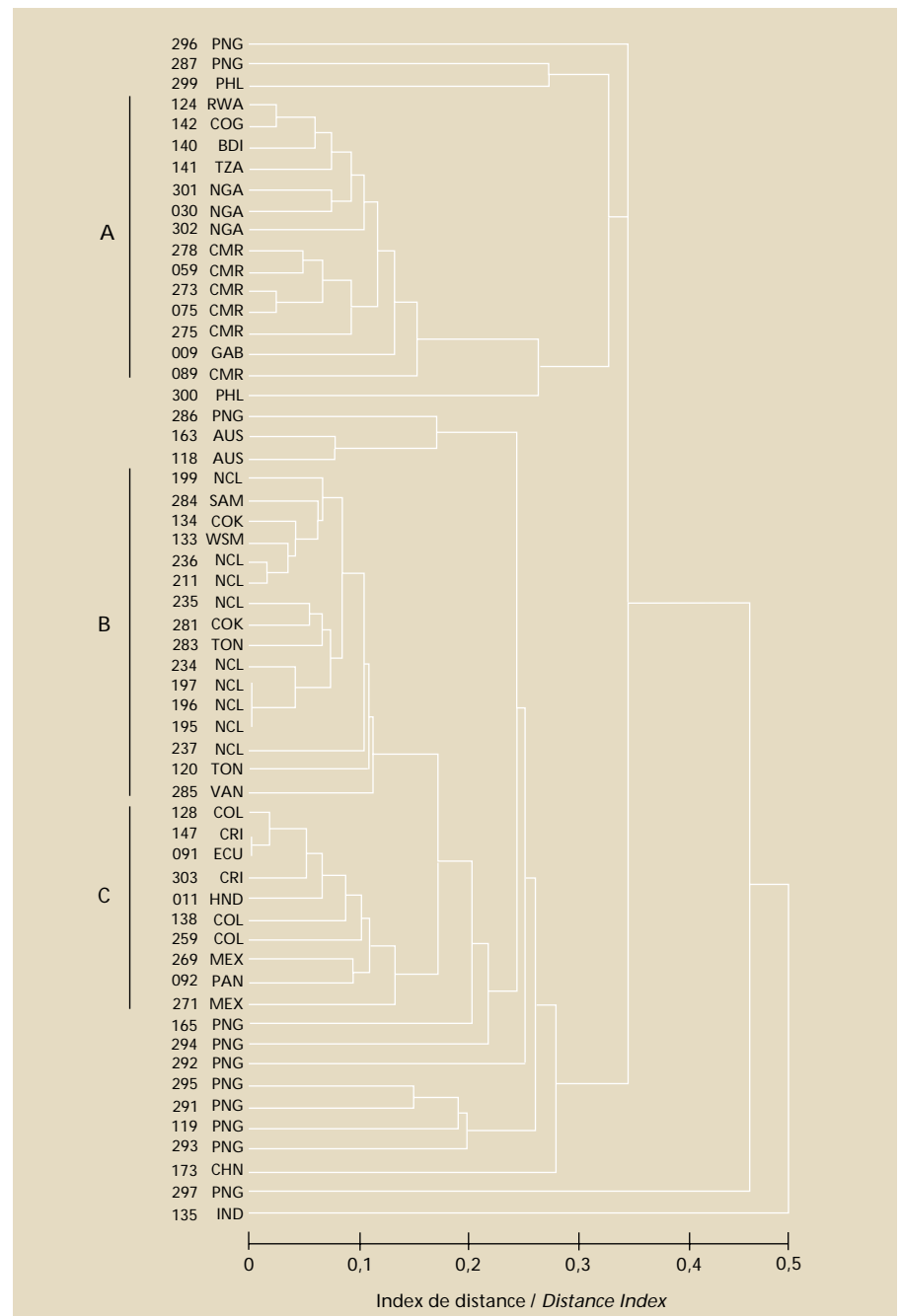


Figure 2. Structure de la diversité des isolats de *Mycosphaerella fijiensis* de diverses origines géographiques (A : Afrique, B : Pacifique, C : Amérique) (d'après J. Carlier *et al.*, 1994).
Structure of diversity of *Mycosphaerella fijiensis* isolates of various geographical origins (A: Africa, B: Pacific, C: America) (according to J. Carlier *et al.*, 1994).

son adoption par les planteurs, nous conduisent au-delà des vingt prochaines années.

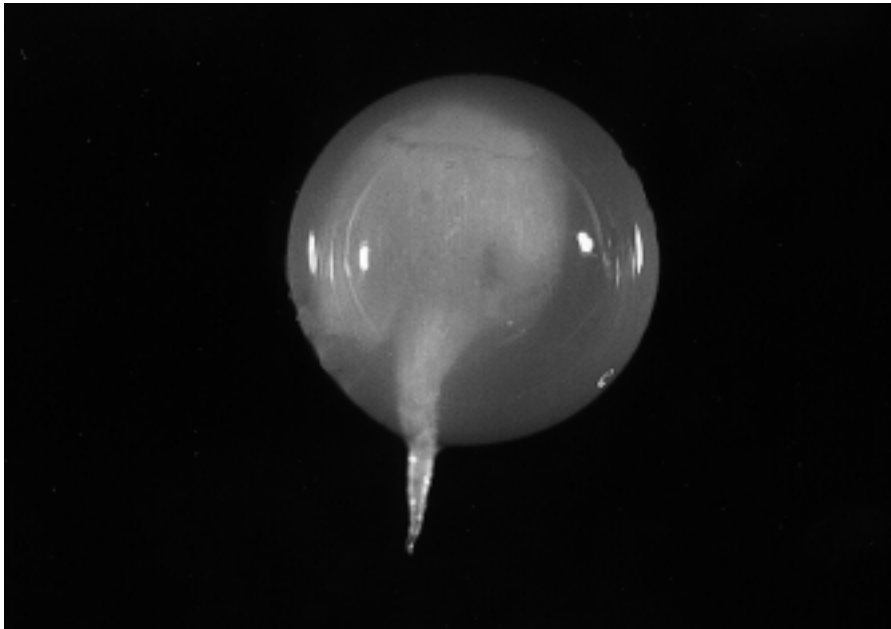
Transformation des produits : des innovations en attente d'application

La majorité des productions des cultures pérennes tropicales est exportée à l'état de

matière première non transformée. Il existe cependant de nombreuses possibilités de valorisation locale de ces produits. On peut citer les biocarburants pour les huiles de palme, de palmiste et de cocotier (Graille, 1991).

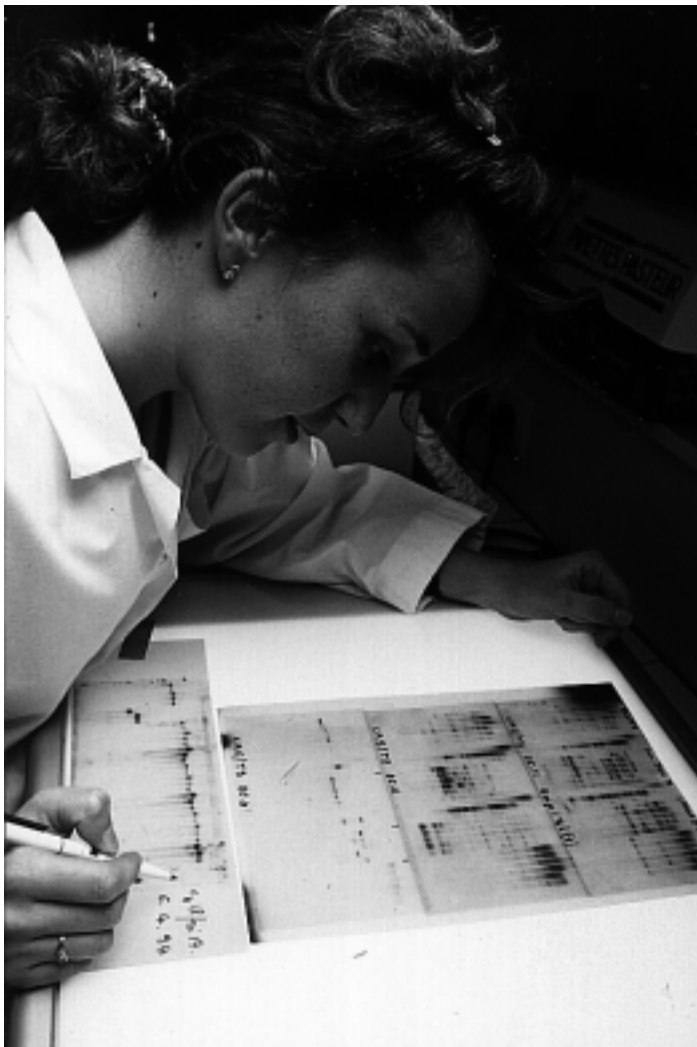
Ainsi, les protéines d'origine unicellulaire (P.O.U.) obtenues en cultivant des levures ou des champignons filamenteux sur l'huile de palme ou ses fractions comme source carbonée (Riaublanc *et al.*, 1992)

A. Rival



Apex de caféier encapsulé pour la cryoconservation.
Coffee stem apex encapsulated for cryopreservation.

A. Rival



Polymorphisme de l'ADN. Observations.
DNA polymorphism. Observations.

ont d'excellentes qualités nutritives, notamment par leur richesse en acides aminés soufrés (méthionine, cystéine). Additionnées à des pâtes alimentaires, elles peuvent dans certains pays aider à corriger les déficits en protéines. La culture en milieu liquide dans des bioréacteurs est au point.

L'interestérification et le biofaçonnement des corps gras à l'aide d'enzymes (lipases régio-sélectives ou latex végétaux à activité acyltransférase) peuvent être utilisés pour valoriser diverses matières grasses en modifiant leur propriétés rhéologiques ou nutritionnelles (Graille *et al.*, 1992).

La valorisation de produits secondaires (tocophérols, tocotrienols, carotène) à partir de ressources renouvelables et biodégradables donne des produits nouveaux : cétones à longues chaînes, tensioactifs, biopolymères...

Enfin pour mémoire, les premières transformations peuvent également bénéficier des biotechnologies : extraction assistée par enzymes des huiles de palme et de coco, contrôle de la fermentation du cacao, démulcage du café et traitement des eaux résiduelles...

Application au développement : atouts et contraintes

Les biotechnologies sont-elles une nouvelle chance pour les pays en développement (Persley, 1990 ; Sasson et Costarini, 1991) ou une fuite en avant ?

Pour les plantes pérennes, nous sommes convaincus qu'il s'agit bien d'une chance à ne pas manquer. Les caractéristiques biologiques de ces espèces : longueur des cycles d'amélioration, encombrement des dispositifs expérimentaux, biologies florales difficiles... condamnent les chercheurs et les développeurs à utiliser des méthodes toujours plus performantes pour espérer gagner la course toujours plus rapide à la compétitivité et à la résolution de problèmes nouveaux (nutritionnels, environnementaux...).

Les pays tropicaux possèdent des avantages : diversité à peine explorée des espèces (fruitiers, caféiers, cacaoyers...), possibilités de rendements inégalables (palmier), coûts de production faibles à modérés. Pour eux, l'alimentation quantitative et qualitative, la protection et la gestion de l'environnement, constituent des enjeux particulièrement cruciaux.

Bon nombre de ces pays, en Asie (Inde, Indonésie, Malaisie, Philippines, Thaïlande...), en Amérique (Brésil, Colombie, Costa Rica, Mexique, Venezuela...), en Afrique (Cameroun, Côte d'Ivoire, Kenya, Nigeria...), ont les capacités scientifiques et les moyens de mettre en œuvre ces technologies (Sasson, 1993).

Il ne fait pas de doute que lorsqu'on aura réduit les coûts de production et garanti la fiabilité des procédés, la diffusion de vitroplants prendra un développement considérable. Une meilleure gestion des cultures (lignées embryogènes en milieu liquide, automatisation, simplification des opérations et des équipements) et la mise au point de marqueurs précoces de conformité seront déterminants.

Les outils de diagnostic et de prévention seront également largement utilisés. Quant aux procédés de transformation, leur évolution dépendra de la volonté et de la capacité du secteur privé à investir dans ces activités. Il ne faut cependant pas sous-estimer les difficultés actuelles et futures dans ces domaines. Elles sont d'ordre économique, institutionnel et structurel.

La recherche est une activité coûteuse. En matière de biotechnologie, les équipements, les produits, les installations et leur maintenance ont considérablement augmenté les coûts d'investissement et de fonctionnement (100 à 120 KF annuels par chercheur, hors équipement). Ces budgets sont souvent incompatibles avec ceux des recherches nationales. En dehors de quelques zones à forte croissance, le secteur privé est réticent à investir dans un domaine où les retours sur investissement sont encore incertains et à longue échéance.

Par ailleurs, la tendance du secteur public à se désengager de la recherche agromique devrait s'accroître. On peut espérer une certaine prise en charge des recherches amont par les universités, mais avec des risques de coupure avec le terrain et les applications. Même dans les pays les plus avancés, il subsiste une méfiance forte du secteur privé envers le secteur public, conduisant plus à une duplication des efforts qu'à une collaboration bénéfique.

Enfin, la plupart des recherches actuelles sont conduites dans des laboratoires du Nord qui ne disposent pas des terrains nécessaires à l'expérimentation. L'application des biotechnologies dans les pays en développement ne se fera que par le transfert de ces techniques au Sud, ce qui suppose un véritable partenariat à long terme. Ce partenariat est rendu difficile du fait des

contraintes précédentes et d'un nationalisme parfois aussi fort que compréhensible, qui risque de conduire à un isolement scientifique alors que seules des coopérations fortes et multilatérales permettront d'avancer. Cet isolement peut être renforcé par le sentiment souvent surestimé de la puissance de ces technologies (on peut tout résoudre) et de leur énorme potentiel de valorisation (cela peut rapporter gros). D'où les attitudes et les clauses de secret et de confidentialité, et le manque de cohérence dans les nombreux projets en cours. Est-il raisonnable de s'engager dans un programme de création clonale ou de transformation génétique sans lien avec un programme d'amélioration structuré ? Combien de laboratoires de culture *in vitro* ont été construits sans même avoir de génotype à multiplier !

Des impacts, bien sûr. Mais quel sera le bilan ?

Sans insister sur l'intérêt scientifique des biotechnologies, notamment pour connaître la biologie des plantes pérennes, dans le domaine socio-économique, quelques remarques s'imposent.

En premier lieu, contrairement à une idée très répandue, les plantes pérennes sont essentiellement cultivées par les petits planteurs. À l'exception du palmier à huile, où le secteur villageois est cependant loin d'être négligeable, 80 à 95 % des plantations de bananiers, cacaoyers, caféiers, cocotiers, hévéas... sont des exploitations de moins de dix hectares. Ces exploitations familiales ont généralement une faible technicité et des possibilités d'investissement quasi nulles. Il y a donc des risques importants de bouleversements socio-économiques à la fois au niveau national (disparition des petits paysans au profit des grosses plantations), et international (déplacements des productions vers les régions les plus avantageuses). Pourtant cela n'est pas obligatoire : il ne faut pas sous-estimer les capacités d'organisation et d'appropriation des innovations des petits paysans - si on leur en laisse la possibilité - face à une certaine inertie des grandes plantations, traditionnellement portées à la valorisation de l'investissement existant. Les progrès réalisés dans les trente dernières années, parfois bien supérieurs à ce que l'on peut attendre des biotechnologies, n'ont pas fondamentalement modifié les structures de production. Et les grandes mutations qui ont pu se produire (palmier, cacaoyer...) sont plus liées aux

politiques agricoles et sociales des États qu'au progrès scientifique lui-même.

Par ailleurs, les produits dits « coloniaux » ou d'exportation seront de plus en plus consommés localement, du fait de la croissance démographique et de l'évolution du niveau de vie. Ceci est net pour les produits oléagineux et le caoutchouc, les fruits, le café, voire le cacao. Dans ce contexte, l'impact du génie génétique pourrait être particulièrement fort dans les pays en développement car les produits qui en résulteront seront plus facilement acceptés que dans les pays du Nord. En outre, la part réservée aux exportations sera plus aisément transformée et valorisée dans les pays producteurs.

Enfin se pose la question complexe de la possible substitution des produits tropicaux par des productions nationales transformées dans les pays développés. On connaît l'incidence des sirops de fructose à base de maïs sur la consommation de sucre de canne aux États-Unis. La production de l'arôme de vanille est techniquement réalisable en fermenteurs et des colzas transformés pour la production d'acides palmitique et laurique sont expérimentés avec succès. Les pays en développement devraient toutefois garder un certain nombre d'avantages comparatifs sur le long terme :

- la compétitivité de produits comme l'huile de palme par rapport aux productions des pays tempérés risque de conduire à des politiques protectionnistes insupportables ;
- un meilleur accueil des produits naturels par les pays développés, par rapport aux produits transformés, quoique l'attitude des consommateurs dans ce domaine dépende fortement des médias et des groupes de pression ;
- les difficultés techniques et/ou économiques de reproduire la structure ou la composition de produits complexes (beurre de cacao, caoutchouc naturel...).

Le potentiel des biotechnologies est maintenant largement reconnu au Nord. Le but de ces quelques réflexions est de réaffirmer leur avenir dans les pays en développement. C'est peut-être même dans ces régions que leur utilisation devrait être prioritaire, face aux grands enjeux globaux souvent évoqués tels que l'environnement ou la durabilité. L'objectif d'une nouvelle révolution « doublement verte » sera difficile à atteindre sans ces technologies.

Leur mise en œuvre sur des objectifs finalisés comporte cependant des difficultés et devra éviter certains écueils. Parmi ceux-ci, leur place, en tant qu'outils de la recherche. Aussi puissants soient-ils, ces ou-

tils ne peuvent tout résoudre, ils doivent être utilisés dans le cadre de systèmes de recherches pluridisciplinaires et cohérents. Leur emploi doit être raisonné et justifié au risque de rester le dernier jouet du savant.

A ceux qui suggéraient de produire du café à partir de lentilles transformées on peut proposer d'autres utopies comme la production de «Chanel N°5» à partir d'hévéas.

La première précaution des biotechnologies sera peut-être d'éviter l'égaré sur des voies mirages pour se concentrer sur des objectifs réalistes adaptés aux vrais besoins des sociétés du Sud. ■

Bibliographie / References

- ASSY-BAH B., ENGELMANN F. (1993) Medium-term conservation of mature embryos of coconut. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **33** : 19-24.
- BAUDOUIN L. (1992) Utilisation des marqueurs moléculaires pour l'amélioration du palmier à huile. I. Marqueurs protéiques. *Oléagineux* **47** (12) : 681-691.
- BERTHAUD J. (1986) Propositions pour une nouvelle stratégie d'amélioration des caféiers de l'espèce *C. canephora*, basée sur les résultats de l'analyse des populations sylvestres. In : *11ème colloque scientifique international sur le café*, Lomé, 11-15 fév. 1985, ASIC (Paris), p. 445-452.
- BESSE P., LEBRUN P., SEGUIN M., LANAUD C. (1993) DNA fingerprints in *Hevea brasiliensis* (rubber tree) using human minisatellite probes. *Heredity* **70** (3) : 237-244.
- CARLIER J., MOURICHON X., GONZALEZ DE LEON D., ZAPATER MF., LEBRUN M.H. (1994) DNA restriction fragment length polymorphisms in *Mycosphaerella* species causing banana leaf spot diseases. *Phytopathology* **84** : 751-756.
- DESHAYES A. (1994) Les biotechnologies et les grands défis de l'avenir dans l'agriculture et l'agroalimentaire. *Cah. Agric.* **3** (1) : 51-58.
- DUMET D., ENGELMANN F., CHABRILLANGE N., DUVAL Y. (1993) Cryopreservation of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) somatic embryos involving a desiccation step. *Plant Cell Rep.* **12** : 352-355.
- ENGELMANN F., DAMBIER D., OLLITRAULT P. (1994) Cryopreservation of embryogenic cell suspensions and cultures of *Citrus* using a simplified freezing process. *Cryo-Lett.* **15** (in press).
- ESCALANT J.V., TEISSON C. (1988) Embryogenèse somatique chez *Musa* sp. *C. R. Acad. Sci.* **306** (8) : 277-280.
- GRAILLE J. (1991) Biotechnology in the oils and fats fields : a few possible applications in processing and oleochemistry. *Agro-Ind. Hi-Tech* **2** (6) : 29-35.
- GRAILLE J., PINA M., MONTET D., MUDERHWA J.M. (1992) Making value-added products from palm oil by 1-3 regioselectivity enzymatic interesterification. *Elaeis* **4** (1) : 1-10.
- JONES L.H. (1989) Prospects for biotechnology in oil palm (*Elaeis guineensis*) and coconut (*Cocos nucifera*) improvement. *Biotechnol. Genet. Eng. Rev.* (7) : 281-296.
- LANAUD C., SOUNIGO O., AMEFIA Y.K., PAULIN D., LACHENAUD PH., CLÉMENT D. (1987) Nouvelles données sur le fonctionnement du système d'incompatibilité du cacaoyer et ses conséquences pour la sélection. *Café Cacao Thé* **31** (4) : 267-277.
- LANAUD C., RISTERUCCI A.M., N'GORAN J., SOUNIGO O. (1993) Cartographie intégrée du génome du cacaoyer à l'aide de marqueurs biochimiques et moléculaires. In : *XIe conférence internationale sur la recherche cacaoyère*, Yamoussoukro, 18-24 juillet, 14 p.
- LASHERMES P., CROS J., HARMEY P., CHARRIER A. (1993) Use of random amplified DNA markers to analyze genetic variability and relationships of *Coffea* species. *Genet. Resour. Crop Evol.* **40** : 91-99.
- LAURENT V., RISTERUCCI A.M., LANAUD C. (1993) Variability for nuclear ribosomal genes within *Theobroma cacao*. *Heredity* **71** : 96-103.
- LEBRUN P., CHEVALIER M.H. (1990) Starch and polyacrylamide gel electrophoresis of *Hevea brasiliensis* : a laboratory manual. IRCA/CIRAD, 44 p.
- LECONTE *et al.* (1994) Electrophorèse : application à l'identification clonale de l'hévéa. *Plantations, recherche, développement* **1** (2) : 28-33.
- MONTORO P., ETIENNE H., MICHAUX-FERRIERE N., CARRON M.P. (1993) Callus friability and somatic embryogenesis in *Hevea brasiliensis*. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **33** (3) : 331-338.
- MOUYNIA I., RENARD J.L., BRYGOO Y. (1994) Characterization and DNA polymorphism using a repetitive sequence in *Fusarium oxysporum* f. sp. *elaeidis* isolated from oil palm (soumis pour pub. à *Mycol. Res.*).
- OLLITRAULT P., FAURE Y. (1992) Système de reproduction et organisation de la diversité génétique dans le genre *Citrus*. In : *colloque international «Complexes d'espèces, flux de gènes et ressources génétiques*, Paris, 8-10 janvier 1992, Bureau des Ressources génétiques (Paris), p. 135-151.
- OLLITRAULT P., ROCCA SERRA D. de (1992) L'amélioration des agrumes. II. Créations variétales et biotechnologies. *Fruits* **47** (n. spéc. Agrumes) : 124-134.
- PERSLEY G.J. (1990) Beyond Mendel's Garden biotechnology in the service of world agriculture. C.A.B. International (Oxon), Serie : Biotechnology in Agriculture (1), 155 p.
- RIAUBLANC A., BOZE H., DEMUYNCK M., MOULIN G., RATOMAHENINA R., GRAILLE J., GALZY P. (1992) Optimization of biomass production from palm oil in cultures using *Candida rugosa*. *Fat Sci. Technol.* **94** (2) : 46-51.
- ROHDE W., KULLAYA A., MPUNAMI A., BECKER D. (1993) Rapid and sensitive diagnosis of mycoplasma-like organisms associated with lethal disease of coconut palm by a specifically primed polymerase chain reaction for the amplification of 16 S rDNA. *Oléagineux* **48** (7) : 319-322.
- SASSON A. (1993) Biotechnologies in developing countries : present and future. Volume 1 : regional and national survey. UNESCO (Paris), Serie : Future-oriented Studies, 781 p.
- SASSON A., COSTARINI V. Eds (1991) Biotechnologies in perspective. UNESCO (Paris), Serie : Future-oriented Studies, 166 p.
- TOUCHET B. DE, DUVAL Y., PANNETIER C. (1991) Plant regeneration from embryogenic suspension cultures of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Plant Cell Rep.* **10** (10) : 529-532.
- VERDEIL J.L., BUFFARD MOREL J., RIVAL A., GROSDMANGE R., HUET C., PANNETIER C. (1993) Coconut clones through somatic embryogenesis. In : *Advances in coconut research and development*, M.K. Nair, H. H. Khan, P. Gopalasundaran and E.V.V. Bhaskara Rao Eds, Oxford and IBH Publishing (New Delhi), p. 173-179.

Biotechnologies : what prospects for tropical tree crops?

Meunier J.

CIRAD-CP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1

The potential of biotechnologies is widely acknowledged. It now remains to make the most appropriate choices and develop partnerships, anticipating the socio-economic consequences of such choices.

This article is a transcript of a paper presented to the ETH (Federal Polytechnic College), Zurich on 8th July 1994 at the Symposium: Biotechnologie für Entwicklungsländer.

Foreseeing the development and possible impact of biotechnologies over the next twenty years is a risky business, deducing their socio-economic consequences becomes a wager.

Such a time span can seem long given the unbelievable speed at which modern genetics are developing, but relatively short in relation to the time spans generally seen with tree crops. Remember, for example, that the first research on oil palm vegetative propagation began twenty-five years ago.

Before tackling the future, it would perhaps be wise to look back at what has happened over the past twenty years. Like Deshayes (1994), it has to be said that despite the remarkable progress made on tools and basic knowledge, the prospects have not changed dramatically and the number of products obtained from biotechnologies remains limited, well below the rapid rise forecast by some. According to the author, this over-optimism stems from our underestimating both the technical difficulties encountered and the complexity of the processes involved in disseminating the innovation.

Nevertheless, we should not let the pendulum swing back too far in the other direction and become over-pessimistic. On the contrary, we should be encouraged to take a more pragmatic look at the still bright prospects offered by biotechnologies.

We shall now go on to review four main fields of biotechnology research as applied to tropical tree crops: *in vitro* tissue culture, molecular tools, genetic engineering and product processing, attempting each time to point out the possible uses and applications. We shall then go on to look at a few aspects of the advantages and risks for developing countries and the possible socio-economic consequences.

In vitro propagation, success and difficulties

The biology of tropical tree crops led breeders to distinguish between:

- plants with a natural possibility of vegetative propagation such as banana, coffee, rubber, etc. for which genetic improvement programmes remained relatively lightweight

for some time (it was easier to breed and multiply elite individuals);

- species that could only be multiplied by seed such as oil palm, coconut, etc. for which efforts were concentrated on improvement, but where the genetic gains made could only partly be transferred by seed. It was for this latter group that the prospects offered by *in vitro* culture seemed particularly attractive at the end of the 1960s. Paradoxically, the technique could be more easily developed and applied for the former group. In banana, for example, multiplication by meristem proliferation is now wholly competitive compared to conventional vegetative propagation. *In vitro* banana plantlets (multiplication capacity, decentralizing production) offers various advantages. The most important aspect is undoubtedly phytosanitary quality, which increases yields whilst reducing the use of nematicides, which are extremely aggressive for the environment. More than 100 million *in vitro* banana plantlets are now produced worldwide each year (Ecuador, Colombia, Philippines, etc.).

The coffee microcutting technique has now been mastered for some twenty years or so. There are multiplication units in Costa Rica, Honduras and Uganda, etc., distributing good quality heterozygous hybrids on a large scale.

For oil palm, multiplication by somatic embryogenesis has been mastered on a small scale. Clone creation and production laboratories exist in Côte d'Ivoire, Indonesia and Malaysia. The results seen on more than a thousand hectares confirm the theoretical progress forecasts: a 12% increase in yields without clone selection and up to 30% after choosing the best clones (table 1). Such progress would be almost impossible in the short term using conventional breeding methods.

This true success should not be allowed to detract from the technical difficulties linked to these procedures. The risk of obtaining variants has to be controlled, particularly in somatic embryogenesis involving a callogenesis phase, as with oil palm. There is also a considerable risk of multiplying the possible natural mutations in banana. Furthermore, the difficulties of shifting

to an industrial scale mean that production costs are still too high, due to the installations and controls required (oil palm).

It is also important to mention that even if these procedures are not directly applied to development, multiplication by microcuttings and/or somatic embryogenesis is possible for almost all cultivated tropical species: rubber, cocoa, citrus fruits, various fruits, eucalyptus, acacia, coconut, etc. (Escalant and Teisson, 1988; Montoro *et al.*, 1993; de Touchet *et al.*, 1991; Verdeil *et al.*, 1993). They can be used as research tools to develop new strategies and methodologies, for example multiplying rootstocks or studying scion: rootstock interactions.

In vitro culture also has applications for research and varietal production: creation of somatic hybrids (citrus fruits) and haploid lines (citrus fruits, coffee, banana), embryo rescue, early tests, etc. These methods are still in their early stages and relatively difficult to use, except in fields likely to develop rapidly:

- exchanges of healthy plant material;
- germplasm preservation, particularly cryopreservation of zygotic or somatic embryos, which has been mastered for several citrus species and oil palm, coconut, coffee, etc. (Assy-Bah and Engelmann, 1993; Dumet *et al.*, 1993; Engelmann *et al.*, 1994).

Power of molecular tools

These new tools, such as enzymatic, phenolic, nucleic markers, obviously prompted a great deal of interest amongst researchers, who at last had a glimpse of a way of analyzing in greater detail the species and populations for which genetic research was still in its early stages.

The structure of genetic diversity and identification

Isozymes were the first genetic markers studied. For each species, between 8 and 15 polymorphic enzyme systems can be analyzed using easily accessible organs: leaves, pollen, embryos, etc.

New knowledge of how diversity within species is organized has confirmed or redirected breeding schemes. The citrus genus was seen to be structured around three poles: citron,

grapefruit and mandarin (Ollitrault and Faure, 1992). In *Coffea canephora*, the detection of two complementary «Guinean» and «Congolese» groups by Berthaud (1986) led to the launch of a reciprocal recurrent selection scheme between the two groups.

The more recent use of RFLP⁽¹⁾ and RAPD⁽²⁾ has provided more details of these structures, particularly in banana, cocoa and rubber (Besse *et al.*, 1993; Laurent *et al.*, 1993). One immediate application was the possibility of checking and identifying plant material. Researchers can check the legitimacy of oil palm progenies under test (each progeny takes up half a hectare for twenty years), the origin of the calli and embryos obtained by ovule culture or the products of somatic fusion in citrus fruits (Ollitrault and Rocca Serra, 1992). For their part, growers now have a way of controlling the hybrid nature of cocoa seeds produced in biclonal seed gardens (Lanaud *et al.*, 1987). Clone conformity errors in hevea budwood gardens can now be detected as a matter of routine (Lebrun and Chevalier, 1990; Leconte *et al.*, 1994).

Aid to breeding

Molecular analysis and genome mapping make it possible to locate genes of agronomic value quite accurately and provide a clearer understanding of how they function. The greatest progress has been made on:

- cocoa, which has a small genome (0.39×10^9 bp⁽³⁾ for the haploid genome, i.e. 2.7 times the *Arabidopsis* genome) and for which there is now a genetic map comprising 193 linked markers with a mean distance of less than 4 centimorgans (Lanaud *et al.*, 1993) (figure 1);
- banana, for which there is a molecular map with 77 markers;
- rubber, citrus fruits and coffee (Lashermes *et al.*, 1993).

This knowledge should enable breeders to locate a certain number of genes early on and monitor them in recombinations: those for disease resistance (*Phytophthora* on cocoa, *Cercospora* on banana, *Microcyclus* on rubber, etc.), those for quality, or even quantitative characters (QTL⁽⁴⁾).

Diagnosis

One of the most promising uses for molecular biology is the identification, characterization and detection of pathogens and their specialized forms within a species. There are already reliable diagnosis tools for many fungi, viruses and viroids, etc. (Rohde *et al.*, 1993). Using RFLP to analyze parasite populations clarifies host x parasite interactions and improves control strategies.

In oil palm, it has been shown that pathogenic *Fusarium oxysporum* strains are grouped in

three branches, one corresponding to Central Africa (Nigeria, Zaire, Cameroon) and the other two to West Africa (Côte d'Ivoire, Benin, Ghana), and that the South American strains were probably introduced from West Africa. A sequence of 2,330bp has also been detected, which seems to be involved in its pathogenicity (Mouyna *et al.*, 1994).

Mycosphaerella spp., which are the causal agents of *Cercospora* on banana and plantain, shows the greatest diversity in Southeast Asia, which is the supposed zone of origin of the fungus. In other regions, the isolates form homogeneous groups specific to each region (figure 2). Given these results, it is now possible to choose the best sites for assessing the material (Carlier *et al.*, 1994).

Identical work is under way for cocoa and coconut *Phytophthora*. «*The implications of this research are considerable in terms of crop protection, but also in terms of risk forecasting and early warning systems. They will be significant for varietal creation and selection*».

However, these techniques are of limited use in developing countries, particularly as regards molecular biology, which calls for substantial investments and close cooperation. If they are to be used to the full, considerable efforts will have to be made to reduce costs and automate and simplify the techniques as much as possible.

Neat long-term solutions: genetic engineering

Genetic engineering research is still in its early stages (development of transformation methods and genetic constructions, the first expressions of conventional markers), but it is obvious that tropical species can benefit from the same possibilities of genome modification as temperate species, for which transgenic varieties are already on the market or currently being launched. Tree crops could even be ideal targets for these technologies.

Citrus fruits and coffee are the most promising candidates insofar as they respond relatively well to transformation and regeneration. In both cases, plants resistant to kanamycin and hygromycin were obtained after transformation with *Agrobacterium tumefaciens* and/or *Agrobacterium rhizogenes*. Banana is also promising, given the difficulties of conventional improvement, linked to the sterility of triploid cultivars. The priority aims are resistance to viruses (banana, citrus fruits) and insects (the coffee leaf miner *Perileucoptera coffeella*).

There are also plans to transform rubber using hevein receptor antisense RNA to inhibit or slow down latex coagulation («haemophilic» clones).

Whatever its worth, this research is essentially prospective for the time being. It is

more than likely that developing techniques and particularly testing and evaluating the material obtained will take us well beyond the next twenty years.

Product processing: innovations waiting to be applied

Most tropical tree crop products are exported as unprocessed raw materials, but there are numerous possibilities for using these products locally, for example biofuels produced from palm, palm kernel or coconut oil (Graillie, 1991).

Similarly, single-cell proteins obtained by culturing yeasts or fibrous fungi using palm oil or its fractions as a carbon source (Riaublanc *et al.*, 1992) are extremely nutritious, notably through their high sulphur-containing amino acid content (methionine, cysteine). When added to pasta, they can be used to correct protein deficiencies in some countries. Culturing in a liquid medium in bioreactors is now feasible.

Interesterification and bioconversion of oils and fats using enzymes (regioselective lipases or latexes of plant origin with an acyltransferase activity) can be used to valorize various oils and fats by modifying their rheological or nutritive properties (Graillie *et al.*, 1992).

Utilizing by-products (tocopherols, tocotrienols, carotene) from renewable and biodegradable resources gives new products: long-chain ketones, surfactants, biopolymers, etc.

Lastly, for the record, primary processing can also benefit from biotechnologies: enzyme-assisted extraction of palm and coconut oil, controlling cocoa fermentation, coffee pulping and effluent treatment, etc.

Application to development: assets and constraints

Are biotechnologies a new opportunity for developing countries (Persley, 1990; Sasson and Costarini, 1991) or should we «look before we leap»?

For tree crops, we are convinced that this is an opportunity not to be missed. The biological characteristics of these species —length of breeding cycles, size of experimental structures, difficult floral biology — mean that researchers and developers are constantly having to use more effective methods if they are to win the increasingly fast race to be competitive and solve new problems (nutrition, the environment).

Tropical countries have their advantages: the diversity of their species has barely been explored (fruit crops, coffee, cocoa), the possibilities of unequalled yields (oil palm), low to

(1) Restriction Fragment Length Polymorphism.

(2) Random Amplified Polymorphic DNA.

(3) bp = base pair.

(4) Quantitative Trait Loci.

moderate production costs. For them, quantitative and qualitative improvements and environmental protection and management are particularly crucial issues.

A good many of these countries in Asia (India, Indonesia, Malaysia, the Philippines, Thailand, etc.), America (Brazil, Colombia, Costa Rica, Mexico, Venezuela, etc.) and Africa (Cameroon, Côte d'Ivoire, Kenya, Nigeria, etc.) have the scientific and financial wherewithal to implement these technologies (Sasson, 1993).

There is no doubt that once production costs have been reduced and the reliability of the procedures guaranteed, *in vitro* plantlet dissemination will really take off. More effective culture management (embryogenic lines in liquid media, automation and simplification of operations and equipment) and the development of early conformity markers will be a determining factor.

Diagnosis and prevention tools will also be widely used. Changes in processing techniques proper will depend on the will and ability of the private sector to invest in these activities. However, it is important not to underestimate the current and future difficulties in these fields: they are economic, institutional and structural.

Research is an expensive business. In the biotechnology field, the costs of equipment, products, installation and maintenance have considerably increased investment and operating costs (100 to 120 KF per researcher, per year, excluding equipment). These figures are often incompatible with national research budgets. Apart from a few rapid-growing areas, the private sector is reluctant to invest in a field where the returns on its investment are as yet uncertain and long-term.

Moreover, the public sector's tendency towards a withdrawal from agricultural research will probably increase. There is some hope of universities becoming more involved in upstream research, but at the risk of becoming cut off from the field and possible applications. Even in the most advanced countries, the private sector is still wary of the public sector, which leads more to a duplication of efforts than to beneficial collaboration.

Lastly, most of the research currently under way is being conducted in laboratories in the North, which do not have the necessary land for experiments. Biotechnologies can only be applied in developing countries by transferring these techniques to the South, which means truly long-term partnerships. These partnerships are made difficult by existing constraints and by a certain nationalism that is sometimes as strong as it is understandable, which could well lead to scientific isolation whereas only strong, multilateral cooperation will ensure progress. This isolation can be exacerbated by the often exaggerated idea of the power of these

technologies (they are the answer to every problem) and of their huge potential for valorization (they could produce big money). This explains the secrecy and confidentiality that prevail and the lack of coherence in the many projects under way. Is it reasonable to embark upon a clone creation or genetic transformation programme that has no links with a structured breeding programme? So many *in vitro* culture laboratories have been built without even any genotypes to multiply!

An impact, obviously, but what of the end result?

Without over-stressing the scientific value of biotechnologies, particularly for providing information on tree crop biology, a few comments have to be made on the socio-economic aspects.

Firstly, contrary to a commonly held belief, tree crops are essentially grown by smallholders. With the exception of oil palm, where the smallholder sector is still far from negligible, 80 to 95% of banana, cocoa, coffee, coconut and rubber plantations cover less than 10 hectares. These family-run farms generally make little use of technology and their ability to invest is virtually nonexistent. There is therefore a high risk of socio-economic upheaval on both a national level (disappearance of smallholdings in favour of large estates) and international level (shift of production towards more favoured areas). However, this is not inevitable: it is important not to underestimate the smallholders' ability to organize their farms and take innovations on board —provided they are allowed to—in the face of a certain inertia on the part of large estates, which have traditionally concentrated on valorizing existing investments. The progress made over the last thirty years, which has frequently been greater than can be expected from biotechnologies, has not fundamentally modified production structures, and the major changes that have occurred (oil palm, cocoa, etc.) are more linked to State agricultural and social policies than to scientific progress as such.

Furthermore, so-called «colonial» or export products will be increasingly consumed locally, due to population growth and a change in living standards. The trend is clear for oils and fats and rubber, fruits, coffee or even cocoa. In this context, genetic engineering could be particularly effective in developing countries as the products obtained will be more readily accepted than in countries in the North. Moreover, the share reserved for export will be easier to transform and valorize in producing countries.

Lastly, there is the complex question of the opportunities for replacing tropical products with processed domestic products in developing

countries. We have seen the effect of maize-based fructose syrups on sugarcane consumption in the United States. It is now technically possible to produce vanilla flavouring in fermenters and tests on transformed rapeseed to produce palmitic and lauric acids have proved successful. Nevertheless, developing countries should keep a certain number of long-term comparative advantages:

- the competitiveness of products such as palm oil compared to products from temperate countries is likely to result in excessively protectionist policies;
- greater acceptance of natural products rather than processed products in developed countries, although consumer attitudes are heavily influenced by the media and pressure groups;
- the technical and/or economic difficulties of reproducing the structure or composition of complex products (cocoa butter, natural rubber, etc.).

The potential of biotechnologies is now widely acknowledged in the North. The aim of this article is to reaffirm their future in developing countries. It may even be in these regions that their use should be a priority, in view of the often-mentioned major global stakes such as the environment or sustainability. The target of a new «doubly green» revolution will be difficult to achieve without these technologies.

However, their application for specific goals involves certain difficulties and will have to avoid certain pitfalls. These include their role as research tools. However powerful they are, these tools are not a panacea, and will have to be used within coherent multidisciplinary research systems. They have to be used rationally and appropriately if they are not to remain merely the researchers' «latest toy».

To those who suggested producing coffee from transformed lentils, maybe we could propose other pipe dreams such as producing «Chanel No. 5» from rubber.

The most important precaution to be taken with biotechnologies may well be to avoid groping for mirages and concentrate on realistic aims adapted to the true requirements of societies in the South. ■

Résumé

L'auteur fait le point des résultats obtenus depuis vingt ans en biotechnologie des cultures pérennes tropicales. Quatre domaines sont examinés : les succès de la multiplication végétative *in vitro* du bananier, de l'hévéa, du caféier... ; les outils moléculaires dans l'étude de la diversité génétique, l'identification, la cartographie du génome et le diagnostic des pathogènes ; la transformation génétique pour l'acquisition de résistance aux virus (bananier, citrus) et aux insectes (caféier) ; la transformation des produits comme les biocarburants et les protéines d'origine monocellulaire. L'utilisation de ces méthodes et de ces outils se heurte, dans les pays en développement, à des obstacles économiques et politiques. Pourtant, c'est peut-être d'eux que viendra leur décollage économique.

Abstract

The author gives a rundown of the results obtained on tropical tree crop biotechnologies over the past twenty years. Four fields are studied: the successful *in vitro* vegetative propagation of banana, rubber, coffee, etc.; molecular tools for studies of genetic diversity, identification, genome mapping and pathogen diagnosis; genetic transformation to confer resistance to viruses (banana, citrus fruits) and insects (coffee); processing products such as biofuels and single-cell proteins. The use of these methods and tools has come up against both economic and political obstacles in developing countries, but it may well be there that they take off economically.

Resumen

El autor recapitula los resultados logrados desde hace veinte años en biotecnología de los cultivos perennes tropicales. Se estudian cuatro sectores: los éxitos de la multiplicación vegetativa *in vitro* del bananero, del hevea, del cafeto...; las herramientas moleculares en el estudio de la diversidad genética, la identificación, la cartografía del genoma y el diagnóstico de los patógenos; la transformación genética para la adquisición de resistencia a los virus (bananero, citrus) y a los insectos (cafeto); la transformación de los productos como los biocarburantes y las proteínas de origen monocelular. La utilización de estos métodos y de estas herramientas tropieza, en los países en desarrollo, en obstáculos económicos y políticos. Sin embargo, quizás serán deudores a estos métodos de su despegue económico.



**Les chercheurs travaillent
pour les planteurs,
Plantations, recherche,
développement vous donne
les résultats de leurs travaux**

*Researchers are constantly working for growers Plantations,
Recherche, Développement passes on the results of their work*

*Los investigadores trabajan para los plantadores Plantations,
recherche, développement les da los resultados de sus tabajos*